

## **ZÁRÓJELENTÉS**

**NEMLINEÁRIS DINAMIKUS RENDSZEREK ANALÍZIS ALAPÚ IRÁNYÍTÁSA**

című OTKA pályázatról

2004. jan. 1. - 2007. dec. 31.

(Vezető kutató: dr. Szederkényi Gábor)

Az elegendően széles működési tartományban üzemeltetett technológiai rendszerek dinamikus viselkedése az esetek nagy többségében jelentős nemlinearitásokat mutat. Az ilyen rendszerek működési elveinek mélyebb megértéséhez és a felmerülő szabályozási problémák szigorú követelményeket is kielégítő hatékony megoldásához elengedhetetlenül szükséges a nemlineáris rendszer- és irányításelmélet analízis- és szabályozótervezési módszereinek jól átgondolt alkalmazása és bizonyos esetekben a megoldandó feladatokhoz kapcsolódó továbbfejlesztése. Kutatásainkban elméleti szempontból is igényes megoldásokat próbáltunk adni nemlineáris viselkedésű termodinamikai, mechanikai, elektromos és vegyes fizikai mechanizmusokkal rendelkező technológiai rendszerek analízisének és irányításának területén felmerülő problémákra. Munkánk során nagy mértékben támaszkodtunk az MTA-SZTAKI Folyamatirányítási Kutatócsoportjában Prof. Hangos Katalin által kidolgozott modellezési módszertanra, amelynek segítségével megfelelő pontosságú, de a lehető legkisebb számításigényű dinamikus modelleket tudtuk felhasználni vizsgálatainkhoz.

Kutatásainkat az alábbi résztémák köré csoportosítva végeztük:

1. Nemlineáris dinamikus rendszerek analízise és identifikációja
2. Nemlineáris dinamikus rendszerek irányítása

Az egyes témakörök tárgyalásánál tömören leírjuk az elért legfontosabb tudományos eredményeket, végül pedig felsoroljuk a résztvevő kutatókat beleértve a később csatlakozó fiatal kutatókat, a külföldi együttműködő partnereket és a megvédett ill. készülő PhD dolgozatokat.

A pályázat indulásakor a kutatócsoportban két PhD fokozattal rendelkező kutató volt, a pályázati időszakban a csoport további két tagja sikeresen megvédte PhD értekezését, további két tag pedig szintén sikerrel lezárta értekezésének munkahelyi vitáját. A pályázat ideje alatt természetes módon további fiatal kutatók kerültek kapcsolatba a kutatócsoporttal, akik munkájukkal hozzájárultak az elért tudományos eredményekhez és azok nemzetközi szinten történő publikálásához.

## **1. NEMLINEÁRIS DINAMIKUS RENDSZEREK ANALÍZISE ÉS IDENTIFIKÁCIÓJA**

A nemlineáris rendszer- és irányításelmélet analízis módszereit alkalmaztuk speciális nemlineáris rendszerosztályok irányítási célú analíziséhez. A vizsgált rendszerosztályok közé tartoznak a differenciál-algebrai modellek, a kvázipolinom (QP) rendszerek, a QP modellek részhalmazát alkotó reakciókinetikai rendszerek, illetve a valós fizikai modellek energia típusú tárolófüggvénye és belső strukturális kapcsolatai alapján felírható ún. hamiltoni rendszerek. Az egyedi analízisen túlmenően figyelemre méltó összefüggéseket is megállapítottunk a vizsgált rendszerosztályok között. Az elért elméleti eredményeket valós technológiai rendszerek modelljein alkalmaztuk.

Az egyes részrendszerek (csatoltság erősségétől függő) szétválasztásán alapuló identifikációs módszert dolgoztunk ki és alkalmaztunk komplex technológiai folyamatok paramétereinek mérési adatok alapján történő becsléséhez.

### **Eredmények**

Megvizsgáltuk a modellegyszerűsítési feltételek differenciál-algebrai (DAE) folyamatmodellek differenciális indexére gyakorolt hatását. A folyamatmodellhez ún. egyenlet-változó gráfot rendeltünk. Maximális párosítások keresésén alapuló gráfelméleti algoritmusok segítségével kezeltük a változók és egyenletek egymáshoz rendelésének változásait. Az alkalmazott algoritmusok segítségével módszert adtunk arra, hogy bizonyos modellegyszerűsítési lépések után hogyan kaphatunk számítási szempontból előnyös 1-es indexű modellt [14].

Megmutattuk, hogy QP és Lotka-Volterra (LV) modellek globális stabilitása egy gyakran alkalmazott entrópia-alapú Ljapunov-függvényre nézve ekvivalens a modell egyensúlyi pont körüli lokális disszipatív-hamiltoni leírásának lehetőségével, ahol a Hamilton-függvényt egy diagonális kvadratikussal alak definiálja. Megadtuk továbbá a Ljapunov-függvény és a Hamilton-függvény kapcsolatát [31]. Megmutattuk, hogy a QP rendszerek stabilitásának bizonyítását megkönnyítő idő-átskálázási transzformációk egy fontos osztálya ekvivalens egy megfelelően megkonstruált (és numerikus eszközökkel viszonylag jól kezelhető) bilineáris mátrixegyenlőtlenség megoldhatóságával, ahol az ismeretlenek az idő-átskálázási transzformáció illetve a Ljapunov-függvény paraméterei [32]. Módszert adtunk nemlineáris folyamatrendszerek QP leírás alapján történő stabilitásvizsgálatára, amely kiterjed a globális stabilitás analízisére és lokális stabilitás esetén a stabilitási tartomány becslésére [17]. Polinomiális időbonyolultságú algoritmust fejlesztettünk ki QP rendszerek bizonyos típusú (legalább egy változóban explicit) invariánsainak a modellegyenletekből történő rekonstrukciójára. Az algoritmus segítségével algebrai úton sikerült megoldani olyan nemlineáris irányíthatóság-vizsgálati problémát, amelyet korábban csak parciális differenciálegyenletek analitikus megoldásával tudtunk kezelni [26]. Egy kisteljesítményű gázturbina zéró-dinamikáját analizáltuk kvázipolinomiális reprezentáció segítségével. Lineáris mátrixegyenlőtlenségek megoldásával meghatároztuk a zéró-dinamika garantált stabilitási tartományát [25].

Az irreverzibilis termodinamika és a passzivitáselmélet eredményeinek felhasználásával olyan nemlineáris koordináta-transzformációt adtunk meg (bio)kémiai reakcióhálózatok dinamikus modelljeihez, melynek segítségével a reakciókat globálisan stabilizáló passziváló szabályozók tervezhetők [22, 23]. A

nemlineáris rendszer- és irányításelmélet eszközeinek segítségével vizsgáltuk komplex kémiai és biokémiai reakcióhálózatok dinamikus viselkedését. Megmutattuk, hogy az ún. reakcióterben (amely a koncentrációk teréből egy megfelelő nemlineáris koordinátatranszformációval állítható elő) bármely zárt, független reakcióvektorokkal rendelkező reverzibilis reakcióhálózat lokálisan disszipatív hamiltoni struktúrával rendelkezik. Ezzel világos különbséget mutattunk ki az összefüggő és független reakcióvektorokat tartalmazó biokémiai hálózatok lokális dinamikus működése között [13, 20, 21]. Ide vonatkozó eredményeinket egy, a Springer kiadónál 2007-ben Jie Bao és Peter L. Lee szerzőktől megjelent könyv egyedüli meghívott fejezetében is közölhattuk [11].

Elméletileg jól megalapozott modellezési módszertan felhasználásával elkészítettük a Paksi Atomerőmű primer körének irányítási célú dinamikus modelljét alacsony dimenziós nemlineáris input-affin állapotter-modellel formájában [5, 19]. A modellt a rendszerelméleti megközelítésnek megfelelően részrendszerekre bontottuk, figyelembe véve a jelenlegi szabályozási struktúrát. A kapott modell paramétereit a rendszerdekompozíció eredményeinek felhasználásával az erőmű által rendelkezésre bocsátott mérési adatok felhasználásával predikciós hibán alapuló módszerrel identifikáltuk [4, 6]. A primerköri nyomás meghatározott határok közötti tartásáért felelős térfogatkiegyenlítő tartályt külön is modelleztük ill. identifikáltuk [34].

## **2. NEMLINEÁRIS DINAMIKUS RENDSZEREK IRÁNYÍTÁSA**

A szabályozási célú analízis eredményeinek felhasználásával különböző szabályozási célokat (stabilizálás, állandó és időben változó referenciakövetés, zavarelnyomás, paraméterbecslésen alapuló adaptív szabályozás) megvalósító szabályozó struktúrákat terveztünk. A szabályozók működését az analízis során is felhasznált rendszermodelleken vizsgáltuk.

### **Eredmények**

Megfelelő bemenetek és kimenetek definiálásával megadtuk QP rendszerek nemlineáris irányításelméletben is használható alakját. Megmutattuk, hogy lineáris kimenetek kiválasztásával a QP rendszerek zéró dinamikája is QP alakú marad, amelynek stabilitása a korábban kifejlesztett módszerekkel vizsgálható [18, 33]. Megmutattuk továbbá, hogy ún. monomokban lineáris visszacsatolási struktúra esetén a globálisan stabilizáló szabályozás megtervezésének problémája bilineáris mátrixegyenlőtlenségek megoldhatóságára vezethető vissza, ahol a változók a monomok visszacsatolási erősítési együtthatói, illetve a zárt rendszer Ljapunov-függvényének paraméterei. Az eredményeket egyszerű folyamatrendszerek modelljein szemléltettük [16].

Egy valós mérési adatok alapján identifikált és validált kisteljesítményű gázturbina-modellel terveztünk input-output linearizáláson alapuló szabályozókat. A bemenet értékészletének korlátozásait ún. multiparametrikus optimalizáláson alapuló szabályozóval kezeltük [3]. Az előző eredményeket továbbfejlesztve adaptív referenciakövető szabályozót terveztünk a gázturbina-modellel. Az adaptív szabályozókör az esetlegesen időben változó terhelőnyomaték on-line becslésére szolgáló algoritmust tartalmaz. A zárt kör robusztusnak bizonyult a bizonytalan modellparaméterekre és az időben változó környezeti paraméterekre nézve [24].

A Paksi Atomerőmű primerkörében található térfogatkiegyenlítő tartály identifikált modelljének ismeretében olyan diszkrét idejű modell-prediktív szabályozót terveztünk a rendszerre, amely az állapotváltozókra és a bemenetre vonatkozó korlátozások betartása mellett is megfelelő szabályozási teljesítményt nyújt [29, 30]. A szabályozót továbbfejlesztettük a diszkrét idejű LPV rendszerek elméletének felhasználásával, és a visszacsatolás eredetileg magas számítási igényét csökkentő megoldást javasoltunk [27]. A témakörben elvégzett vizsgálatok nagyban hozzájárultak a primerköri nyomásssabályozó rendszer gyakorlatban is megvalósult sikeres rekonstrukciójához, amelyért Péni Tamás, Szabó Zoltán, Varga István és Szederkényi Gábor 2007-ben Akadémiai Ifjúsági Díjat kapott. A kifejlesztett és identifikált teljes primerköri modell szabályozási lehetőségeit is vizsgáltuk. A kezdeti szimulációs eredmények megmutatták, hogy a jelenlegi dinamikus viselkedés bizonyos jellemzői lényegesen javíthatók a szabályozó struktúra megfelelő megválasztásával és hangolásával.

Lineáris és nemlineáris szabályozási módszereket vizsgáltunk és hasonlítottunk össze egy nemlineáris végtagmodell irányításához. Megállapítottuk, hogy széles működési tartományban a nemlineáris kimenetkövető szabályozás tulajdonságai (időtartománybeli teljesítmény, bemeneti energiafogyasztás) előnyösebbek a lineáris szabályozás jellemzőinél [3, 7]. Ezt követően a végtagmodellt egymással összekapcsolt nemlineáris alrendszerek kompozíciójaként írtuk fel. Ezt az irányítási szempontból előnyös struktúrát kihasználva olyan referenciakövető szabályozókat terveztünk, amelyek meghatározott modellbizonytalanságokat (pl. terhelésváltozás) is képesek kezelni [2].

Lineáris változó paraméterű (LPV) modellek irányításának elméletén alapuló dinamikus inverz alapú sebességekvető szabályozót terveztünk közúti járművekhez. A zárt szabályozási kör kvadratikus stabilitását alkalmasan választott kontroll Ljapunov függvény megadásával minden vizsgált esetben bebizonyítottuk [28]. Kétszintű szabályozót terveztünk haszongépjárművek aktív felfüggesztésének szabályozásához. A referencia-erő generálásához használt magas szintű szabályozó LPV technikán alapul. A referencia követésére alkalmazott alacsony szintű szabályozó megtervezéséhez az aktuátordinamika nemlineáris, hibrid modelljét felhasználva az ún. „backstepping” módszert alkalmaztuk [8, 9].

**Résztvevő kutatók:** Ailer Piroska, Hangos Katalin, Magyar Attila, Németh Huba, Pongrácz Barna, Szederkényi Gábor

**Később csatlakozott kutató (PhD hallgató):** Fazekas Csaba, Péni Tamás

**Külföldi együttműködő partnereink:** Prof. Antonio A. Alonso és Irene Otero-Muras, IIM-CSIC (Vigo, Spanyolország)

#### **Sikeresen megvédett PhD értekezések**

- Németh Huba: Nonlinear modelling and control for a mechatronic protection valve. Budapest University of Technology and Economics, Hungary, 2004.  
<http://daedalus.scl.sztaki.hu/index.html#phd>
- Magyar Attila: State estimation and state feedback control in quasi-polynomial and quantum mechanical systems, University of Pannonia, 2007.  
[http://daedalus.scl.sztaki.hu/PCRG/amagyar\\_vedes.php?lang=hun](http://daedalus.scl.sztaki.hu/PCRG/amagyar_vedes.php?lang=hun)

**Készületben lévő PhD értekezések (a munkahelyi vita már megtörtént)**

- Fazekas Csaba: Modeling and model calibration of complex dynamical systems applied to the primary circuit of a nuclear power plant, University of Pannonia  
[http://daedalus.scl.sztaki.hu/PCRG/csfazekas\\_hazivedes.php](http://daedalus.scl.sztaki.hu/PCRG/csfazekas_hazivedes.php)
- Pongrácz Barna: Analysis and control of differential algebraic equation systems in quasi-polynomial form, University of Pannonia  
[http://daedalus.scl.sztaki.hu/PCRG/bponggracz\\_hazivedes.php](http://daedalus.scl.sztaki.hu/PCRG/bponggracz_hazivedes.php)

**IRODALOMJEGYZÉK**

- [1] Ailer, P.; Pongrácz, B. and Szederkényi, G. (2005), Constrained control of a low power industrial gas turbine based on input-output linearization. International Conference on Control and Automation – ICCA 2005, Budapest, Hungary, 368--373.
- [2] Csercsik, D.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2007), Cascade stabilization and reference tracking of a simple nonlinear limb model. 26th IASTED International Conference on Modeling, Identification, and Control - MIC 2007, Acta Press, Innsbruck, Austria, ISBN 978-0-88896-633-1 / 978-0-88986-635-5., 369--374.
- [3] Fazekas, C.; Csercsik, D.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2007), Simulator for multi-scale musculoskeletal models with reflex circuits. 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Ljubljana, Slovenia, ISBN: 978-3-901608-32-2, on CD.
- [4] Fazekas, C.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2008), Identification of the primary circuit dynamics in a pressurized water nuclear power plant. 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, accepted.
- [5] Fazekas, C.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2007), A simple dynamic model of the primary circuit in VVER plants for controller design purposes, *Nuclear Engineering and Design* **237**, 1071--1087.
- [6] Fazekas, C.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2007), Model identification of the primary circuit at the Paks Nuclear Power Plant, 26th IASTED International Conference on Modeling, Identification, and Control - MIC 2007, Acta Press, Innsbruck, Austria, ISBN 978-0-88896-633-1 / 978-0-88986-635-5, 464--469.
- [7] Fazekas, C.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2006), Linear and nonlinear control of musculoskeletal systems, 25th IASTED International Conference, Modeling, Identification, and Control - MIC 2006', Lanzarote, Spain, 219--224.
- [8] Gáspár, P. and Szederkényi, G. (2007), Combined LPV and nonlinear control of an active suspension system, Proc. of the 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2007), Vigo, Spain, ISBN: 1-4244-0755-9, 215--220.
- [9] Gáspár, P.; Szederkényi, G.; Szabó, Z. and Bokor, J. (2008), The design of a two-level controller for suspension systems, 17th IFAC World congress, Seoul, Korea', accepted.
- [10] Hangos, K.; Bokor, J. and Szederkényi, G. (2004), *Analysis and Control of*

*Nonlinear Process Systems*, Springer-Verlag.

- [11] Hangos, K. & Szederkényi, G. (2007), *Thermodynamical foundations of passivity based process control*, 29 pp., chapter 2 in: Jie Bao and Peter L. Lee. *Process Control (The Passive Systems Approach)*, Springer-Verlag.
- [12] Hangos, K. and Szederkényi, G. (2004), Process systems: theory and applications from different aspects, *ERCIM News* **no. 56.**, 35--36.
- [13] Hangos, K.; Szederkényi, G. and Otero-Muras, I. (2006), Process control based on physical insight: passivity and Hamiltonian system models, in J. Bokor and K.M. Hangos, ed., *Proceedings of the Workshop on System Identification and Control Systems, Advanced Vehicles and Vehicle Control Knowledge Center of BME*, Budapest, Hungary, pp. 129--146.
- [14] Hangos, K.; Szederkényi, G. and Tuza, Z. (2004), The effect of model simplification assumptions on the differential index of lumped process models, *Computers and Chemical Engineering* **28**, 129--137.
- [15] Lombai, F. and Szederkényi, G. (2008), Trajectory tracking control of a 6-degree-of-freedom robot arm using nonlinear optimization, The 10th International Workshop on Advanced Motion Control, Trento, Italy, accepted.
- [16] Magyar, A.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2008), Globally stabilizing feedback control of process systems in generalized Lotka-Volterra form, *Journal of Process Control* **18**, 80-91.
- [17] Magyar, A.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2004), Quadratic stability of process systems in generalized Lotka-Volterra form, 6th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems – NOLCOS 2004, Stuttgart, Germany, 357--362.
- [18] Magyar, A.; Szederkényi, G. and Hangos, K. M. (2005), Quasi-polynomial System Representation for the Analysis and Control of Nonlinear Systems, *Proceedings of 16th IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic, Tu-A22-TO/5 (on CD).
- [19] Németh, E.; Fazekas, C.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2007), Modeling and simulation of the primary circuit of the Paks nuclear power plant for control and diagnosis, 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, Ljubljana, Slovenia, ISBN: 978-3-901608-32-2, on CD.
- [20] Otero-Muras, I.; Szederkényi, G.; Alonso, A. and Hangos, K. (2008), Local dissipative Hamiltonian description of reversible reaction networks, *Systems and Control Letters* **to appear**, doi: 10.1016/j.sysconle.2007.12.003.
- [21] Otero-Muras, I.; Szederkényi, G.; Alonso, A. and Hangos, K. (2006), Dynamic analysis and control of chemical and biochemical reaction networks, *International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes - ADCHEM 2006*, Gramado, Brazil, 165--170.

- [22] Otero-Muras, I.; Szederkényi, G.; Hangos, K. and Alonso, A. (2008), Dynamic analysis and control of biochemical reaction networks, *Mathematics and Computers in Simulation*, to appear.
- [23] Otero-Muras, I.; Szederkényi, G.; Hangos, K. and Alonso, A. (2006), Dynamic analysis and control of biochemical reaction networks, 5th Vienna International Conference on Mathematical Modelling - MATHMOD 2006, Vienna, Austria, 4.1--4.10.
- [24] Pongrácz, B.; Ailer, P.; Hangos, K. and Szederkényi, G. (2008), Nonlinear reference tracking control of a gas turbine with load torque estimation, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* **to appear**, doi: 10.1002/acs.1020.
- [25] Pongrácz, B.; Ailer, P.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2004), Stability of zero dynamics of a low power gas turbine, 12th Mediterranean Control Conference on Control and Automation -- MED'04, Kusadasi, Turkey, on CD.
- [26] Pongrácz, B.; Szederkényi, G. and Hangos, K. (2006), An algorithm for determining a class of invariants in quasi-polynomial systems, *Computer Physics Communications* **175**, 204--211.
- [27] Péni, T.; Szederkényi, G. and Bokor, J. (2007), Model predictive control of the hybrid primary circuit dynamics in a pressurized water nuclear power plant, Proc. of the European Control Conference (ECC'2007), Kos, Greece, ISBN: 978-960-89028-5-5, 5361--5367.
- [28] Péni, T.; Szederkényi, G.; Bokor, J. and Hangos, K. (2004), Dynamic inversion based velocity tracking control of road vehicles, 6th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems -- NOLCOS 2004, Stuttgart, Germany, 1199--1204.
- [29] Péni, T.; Varga, I.; Szederkényi, G. and Bokor, J. (2006), Robust model predictive control of a nuclear power plant pressurizer subsystem, 25th IASTED International Conference, Modeling, Identification, and Control - MIC 2006, Lanzarote, Spain, 167--172.
- [30] Péni, T.; Varga, I.; Szederkényi, G. and Bokor, J. (2005), Robust model predictive control with state estimation for an industrial pressurizer system, *Hungarian Journal of Industrial Chemistry* **33**, 89--96.
- [31] Szederkényi, G. and Hangos, K. (2004), Global stability and quadratic Hamiltonian structure in Lotka-Volterra and quasi-polynomial systems, *Physics Letters A* **324**, 437--445.
- [32] Szederkényi, G.; Hangos, K. and Magyar, A. (2005), On the time-reparametrization of quasi-polynomial systems, *Physics Letters A* **334**, 288--294.

[33] Szederkényi, G.; Magyar, A. and Hangos, K. (2006), Quasi-polynomial and Lotka-Volterra representation in nonlinear systems and control theory, *in* J. Bokor and K.M. Hangos, ed., Proceedings of the Workshop on System Identification and Control Systems, Advanced Vehicles and Vehicle Control Knowledge Center of BME, Budapest, Hungary, pp. 147--163.

[34] Varga, I.; Szederkényi, G.; Hangos, K. and Bokor, J. (2006), Modeling and model identification of a pressurizer at the Paks Nuclear Power Plant, 14th IFAC Symposium on System Identification -- SYSID 2006, Newcastle, Australia, 678–683.